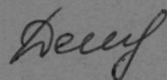


0-784367

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ДЕМИДОВА Татьяна Валерьевна



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ НА РАННИХ СТАДИЯХ
ИХ ЭВОЛЮЦИИ

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

68

Работа выполнена на Кафедре астрофизики Математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Гринин Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Бисикало Дмитрий Валерьевич,

Институт астрономии РАН;

кандидат физико-математических наук

Копецкая Евгения Николаевна,

Лаборатория наблюдательной астрофизики НИАИ им. В.В. Соболева

Математико-механического факультета СПбГУ.

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ.

Защита диссертации состоится 19 октября 2010 г. в 15 ч. 30 м. на заседании совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан *26 08* 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Орлов В.В.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000728498

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Многие молодые звезды окружены околозвездными газопылевыми дисками, в которых рождаются планетные системы, аналогичные нашей Солнечной системе. Большое количество их изображений в разных ракурсах получено с помощью космического телескопа Хаббла (см., например, McCaughrean et al [5] и цитированную там литературу). Наблюдательные проявления околозвездных дисков весьма разнообразны (см., например, обзор [6]). Диски являются источниками инфракрасных (ИК) избытков излучения молодых звезд, изучение которых позволяет исследовать свойства околозвездной материи. При рассеянии излучения звезд околозвездной пылью возникает собственная поляризация молодых звезд. Диски могут быть также источниками разнообразной по своим проявлениям активности молодых звезд, в том числе, переменности их блеска.

Фотометрическая активность является одним из признаков молодости звезд. Ее механизмы и наблюдательные проявления весьма разнообразны (см., например, обзор Петрова [7]). Многие молодые звезды известны как неправильные переменные (Hoffmeister [8], Паренаго [9]). Этот тип переменности встречается как среди молодых звезд солнечного типа (звезды типа Т Тельца), так и среди звезд промежуточных масс (звезды AeBe Хербига). Хербст и др. [10] предложили следующую классификацию переменности молодых звезд: к первому типу классификации относится переменность блеска молодых звезд, обусловленная вращением холодных магнитных пятен, подобных солнечным. Этот тип переменности встречается в основном у звезд типа WTTS (weak line T Tauri stars), характеризующихся низким уровнем аккреционной активности. Второй тип переменности связан с образованием горячих аккреционных пятен на поверхности звезд CTTS (classical T Tauri stars). Горячие пятна представляют собой области столкновения с поверхностью звезды околозвездного вещества, падающего на звезду вдоль магнитных силовых линий. К третьему типу переменности относят иррегулярные флуктуации блеска с большими по амплитуде, непериодическими алголеподобными минимумами. Прототипом этого подкласса молодых переменных звезд является звезда Ae Хербига UX Ori. Амплитуда переменности в отдельных случаях может достигать 4^m (Ростопчина и др. [11]). Этот тип переменности обусловлен изменениями околозвездной экстинкции на луче зрения в результате движения вещества в диске. Он представляет особый интерес. Поэтому остановимся на нем более подробно.

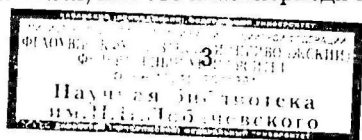
Идея о том, что этот тип переменности молодых звезд может быть обуслов-

лен переменным экранированием звезд непрозрачными околозвездными пылевыми облаками, была предложена в 1969 году немецким астрономом Венцелем [12]. Он предполагал, что молодые звезды окружены сферически-симметричными газопылевыми оболочками, состоящими из отдельных облаков пыли и газа, которые в процессе движения могут время от времени пересекать луч зрения, вызывая ослабления блеска звезд. Такая модель, однако, не могла объяснить ряд важных наблюдательных фактов.

В 1988 году Гринин [14] предложил добавить в модель Венцеля рассеянное излучение. Это позволило довольно просто объяснить неоднозначное поведение показателей цвета этих звезд на диаграммах "цвет-величина" (так называемый, "эффект поглубения", обнаруженный в 1969 году Гетцем и Венцелем [13]). Кроме того, снимался вопрос о том, почему у звезд типа UX Ori не наблюдаются очень глубокие минимумы: рассеянное излучение околозвездного диска ограничивает глубину алголеподобных минимумов.

Новая модель предсказывала рост линейной поляризации при ослаблениях блеска звезд и это предсказание подтвердилось в ходе синхронных фотометрических и поляризационных наблюдений этих звезд (Гринин и др. [15]). Оказалось, что степень поляризации в глубоких минимумах достигает 5-8 процентов, что возможно лишь при небольших наклонениях околозвездных дисков относительно луча зрения. На основании этого был сделан вывод о том, что фотометрическая активность звезд типа UX Ori является следствием "оптимальной" ориентации их околозвездных дисков: они наклонены под небольшим углом к лучу зрения. В результате из-за дифференциального вращения вещества в диске количество пыли на луче зрения непрерывно меняется, что и отражается на блеске звезды. Поэтому плотные фотометрические наблюдения звезд типа UX Ori позволяют получить ценную информацию о структуре околозвездных дисков на разных пространственных масштабах. Данная модель фотометрической активности звезд типа UX Ori сейчас является общепринятой и подтверждается также интерферометрическими наблюдениями в ближней ИК области спектра (см., например, Eisner et al [16]).

Анализ многолетних рядов фотометрических наблюдений звезд типа UX Ori показывает, что в поведении блеска многих из них наблюдаются две составляющие: быстрая и медленная. Характерные времена быстрой составляющей (имеющей непредсказуемый характер), - это дни и недели, тогда как характерные времена переменности медленной составляющей - месяцы и годы. В ряде случаев медленная компонента переменности имеет четко выраженный циклический характер. Вопрос о том, являются ли циклы активности периодически повторяющимися событиями, или это квазипериодический процесс, имеет важ-



ное значение для понимания их происхождения. Продолжительность циклов у некоторых звезд типа UX Ori составляет десять и более лет (см., например, Гринин и др. [21], Ростопчина и др. [17]). В таких случаях для решения вопроса об их периодичности нужны длительные ряды наблюдений. Циклы бываю простые по форме, напоминающие синусоиду (см., например, Шаховской и др. [18], Артеменко и др. [19]). Встречаются и более сложные циклы, имеющие двухкомпонентную структуру [21]. В тех случаях, когда одновременно с фотометрическими наблюдениями осуществлялся длительный поляриметрический мониторинг звезд с фотометрическими циклами, эти циклы наблюдались также в изменениях параметров линейной поляризации (см., например, [20]).

Существование циклической компоненты в изменениях блеска звезды типа UX Ori свидетельствует о физических процессах в диске, порождающих модуляцию околозвездной экстинкции. Циклические изменения околозвездной экстинкции могут быть вызваны потоками вещества и волнами плотности в диске двойной системы, вызванные движением компаньонов. Такая идея была предложена в качестве рабочей гипотезы в [21]. Поскольку двойственность - явление широко распространенное в мире звезд, представляет интерес попытаться построить количественные модели циклов активности, основанные на этой гипотезе.

Газодинамические процессы в молодых двойных системах впервые детально исследовали Артимович и Любов [22],[23] с помощью метода гидродинамического сглаживания частиц (SPH). В их модели двойная система находится в центре общего диска (ниже будем называть его СВ диском от английского "circumbinary"). Плоскость диска и орбита системы компланарны. Моделирование начиналось с осесимметричного распределения 20 000 пробных частиц. Задача решалась в изотермическом приближении. Расчеты показали, что под действием гравитационных возмущений в центральной части СВ диска возникает полость, свободная от вещества. Ее размер зависит от отношения масс компонентов системы и ее эксцентриситета и составляет около 2 – 3а. Под действием сил вязкости и гравитационных возмущений в эту полость проникают два, в общем случае, неравных по мощности потока вещества, которые поддерживают аккреционную активность компонентов и образуют аккреционные диски вокруг каждого из них. В системах с маломассивным компаньоном доминирует один поток околозвездного вещества, питающий его аккреционный диск. В системах с некруговыми орбитами аккреция вещества на компоненты системы зависит от фазы орбитального периода: она усиливается в моменты максимального сближения компонентов. Этот результат был подтвержден в работе Рожички и Лафлина [24], применившими конечно-разностный метод

решения задачи, и что особенно важно, его подтвердили наблюдения тесных двойных систем с эксцентрическими орбитами (Mathieu et al [25], Basri et al [26], Martin et al [27]).

В работе Гюнтера и Клея [28] были рассмотрены неизотермические модели с параметрами близкими к реальным системам. Расчеты Гюнтера и Клея также подтвердили вывод Артимович и Любова о пульсирующем характере аккреции в системах с эксцентрическими орбитами.

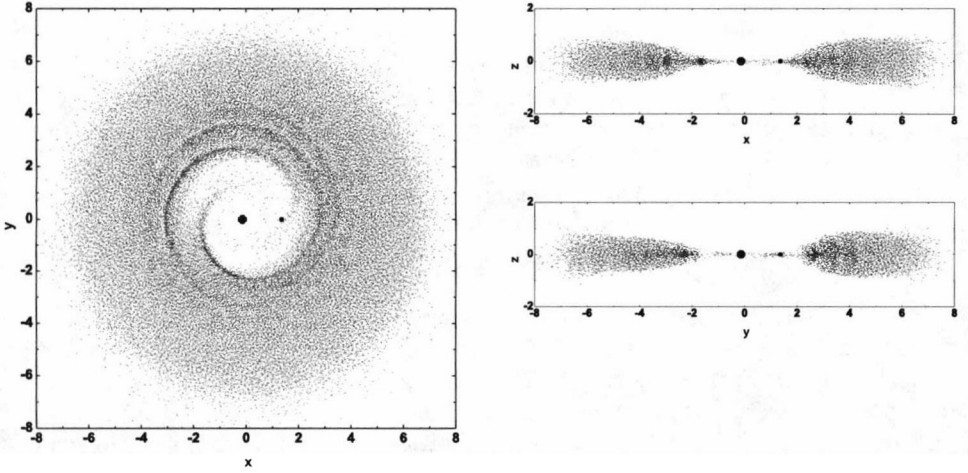


Рис. 1: Модельное распределение вещества в двойной системе, рассчитанное методом SPH. Отношение масс компонентов $q = M_2 : M_1 = 0.1$, эксцентриситет орбиты $e = 0.5$. Вторичный компонент находится в апоцентре, показан 30-ый оборот двойной системы от начала отсчета. Шкала по осям указана в единицах большой полуоси орбиты. Вращение системы происходит против часовой стрелки.

Первые газодинамические расчеты молодых двойных систем с целью изучения их фотометрических свойств были выполнены в статье Сотниковой и

Гринина [29]. Они показали, что в молодых двойных системах, аккрецирующих вещество из остатков протозвездного облака, и наклоненных под небольшим углом к лучу зрения, могут возникнуть три типа колебаний экстинкции на луче зрения. Основной период P_1 , который проявляется во всех моделях, равен орбитальному и вызван потоками вещества, периодически проникающими из общего диска внутрь системы и пересекающими луч зрения. Второй период P_2 , примерно в 5-8 раз больший орбитального, вызван движением волны плотности в общем диске. Третий период P_3 обусловлен медленной прецессией общего диска и равен нескольким сотням орбитальных периодов.

Целью данной работы является более детальное изучение фотометрических свойств молодых двойных систем (в широком смысле этого понятия, включающем, как предельный случай, звезду и коричневый карлик в качестве компаньона) и применение результатов расчетов при интерпретации циклических изменений блеска звезд типа UX Ori и родственных им объектов. Для решения этой задачи используется разработанная Н.Я. Сотниковой [30] программа расчета сложных газодинамических систем методом SPH. С помощью этой программы рассчитаны сетки газодинамических моделей молодых двойных систем (рис. 1). На их основе построены теоретические кривые блеска (на длине волны, соответствующей максимуму полосы пропускания V стандартной фотометрической системы Джонсона) и исследована их зависимость от параметров систем и их ориентации в пространстве.

Научная новизна работы

1. На основе газодинамических моделей молодых двойных систем **впервые** построены модели их оптической переменности, обусловленной периодическими изменениями околозвездной экстинкции. Рассмотрены как круговые, так и эллиптические орбиты. Отношение масс компонентов варьировалось в широких пределах от 0.5 до 0.003.
2. **Впервые** исследовано влияние параметров двойной системы (отношение масс компонентов, эксцентриситет и ориентация орбиты относительно наблюдателя, вязкость) на характер модуляции ее блеска, вызванной пылевым окружением. Показано, что заметная по амплитуде модуляция блеска главного компонента может наблюдаться даже при небольших значениях темпа аккреции на компоненты системы, порядка $\dot{M}_a \approx 10^{-9} - 10^{-10} M_\odot$ в год, в том числе в системах с маломассивным вторичным компонентом ($q \leq 0.1$). По своим свойствам эта модуляция похожа

на циклы фотометрической активности звезд типа UX Ori.

3. **Впервые** рассчитана аккреционная активность компонентов двойной системы с отношением масс $q \leq 0.1$. Показано, что и в таких системах маломассивный компонент является главным аккретором.

Научная и практическая значимость работы

Впервые решена задача о модуляции блеска молодой двойной системы, наблюдаемой с ребра или под небольшим углом к лучу зрения. Полученные результаты - теоретические кривые блеска - могут быть использованы не только при изучении циклической активности звезд типа UX Ori, но также при исследовании молодых затменных систем, включая системы с маломассивными вторичными компонентами типа V718 Per.

Апробация результатов

Результаты работ докладывались на астрофизических семинарах Астрономического института им. В.В. Соболева и Главной Астрономической Обсерватории, а так же на следующих конференциях:

- The first International Workshop "UX Ori type stars and related topics", May 25-28, 2008, Yalta, Ukraine
- Европейская астрономическая конференция JENAM-2008, Symposium 3: "Planetary Formation and Extra Solar Planets", September 8-12, 2008, Vienna, Austria
- II Пулковская молодежная астрономическая конференция, 2-4 июня 2009, ГАО РАН, Санкт-Петербург
- Конференция по физике и астрономии "Физика.СПб", 29-30 ноября 2009, ФТИ, Санкт-Петербург

Личный вклад автора

Автором диссертации разработаны вспомогательные программы для расчета модуляции околосредней экстинкции на основе SPH моделей молодых двойных систем. Выполнены расчеты кривых блеска для всех рассмотренных в диссертации моделей. Совместно с соавторами выполнен их анализ и исследована зависимость от исходных параметров. Автором рассчитаны и исследованы фазовые зависимости темпа аккреции в моделях с маломассивными вторичными компонентами.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Полный объем диссертации 105 страниц машинописного текста, включая 29 рисунков, 3 таблицы, 10 страниц приложения и список литературы из 76 наименований.

Во **Введении** дается краткое описание современных представлений о проблеме, обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, перечислены положения, выносимые на защиту, приведен список работ, в которых опубликованы результаты данного исследования. Указан личный вклад автора и апробация результатов.

В **первой главе** описан метод газодинамических расчетов моделей молодых двойных систем, помещенных в газопылевой СВ диск. Для расчета газодинамических течений уравнения гидродинамики решались методом SPH в изотермическом приближении. В методе SPH элементы газа представляются частицами конечного размера, что позволяет свести систему гидродинамических уравнений, к обыкновенным дифференциальным. В первой главе приведены основные уравнение и принципы метода SPH, а так же вычислительная схема. Приведены методы редукции результатов расчетов и обоснование выбора модельных параметров.

В данной главе описана модель молодой двойной системы, состоящей из главного компонента массой M_1 и вторичного компонента с массой M_2 . Система погружена в общий газопылевой диск, вещество которого аккрецирует на компоненты двойной системы. Предельным случаем такой системы является молодая звезда с протопланетным диском и планетой-гигантом в фазе интенсивной аккреции. Входными параметрами задачи являются: темп аккреции вещества на компоненты системы (\dot{M}_a), отношение масс компонентов $q = M_2/M_1$, угол наклона орбиты к лучу зрения θ , эксцентриситет e , угол поворота линии апсид относительно наблюдателя ϕ , а так же параметр s — безразмерная скорость звука, характеризующий вязкость. При расчетах варьировались соотношения масс компонентов: $q = M_2 : M_1 = 0.001 - 0.5$ и эксцентриситет орбиты двойной системы: $e = 0 - 0.7$. Варьировался также параметр вязкости. В расчетах не учитываются изменения в орбите двойной системы в течение моделируемого интервала времени, который обычно составлял 70 — 200 орбитальных периодов. Расчет моделей начинался с осесимметричных дисков с размерами, подобными ожидаемым заключительным квазипостоянным величинам. Для моделирования диска обычно использовалось $N \sim (6 - 7) \cdot 10^4$ частиц одинаковой массы.

Во **второй главе** основной акцент сделан на исследовании свойств бимо-

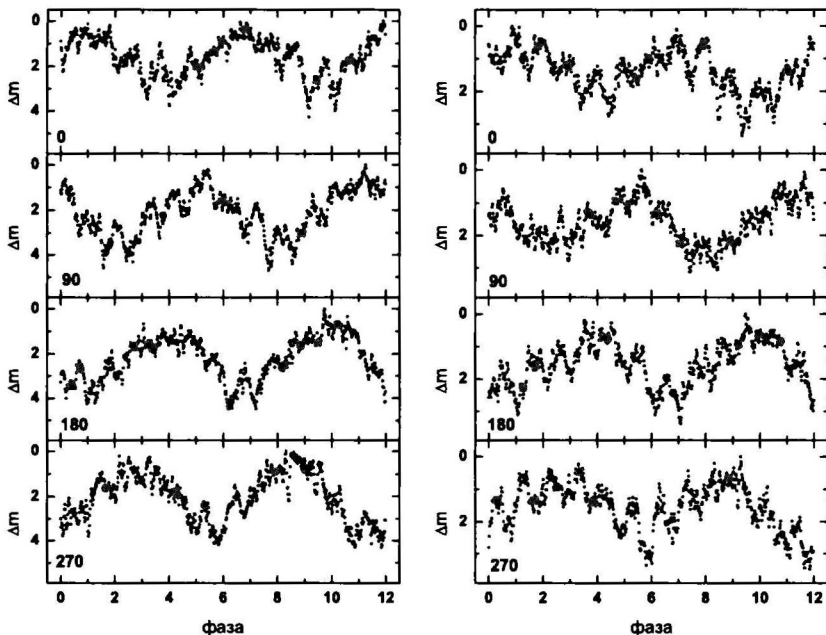


Рис. 2: Бимодальные колебания блеска в модели: "горячий" диск ($c = 0.08$), $e = 0.5$, $q = 0.5$. Слева - луч зрения совпадает с плоскостью орбиты; справа - диск наклонен под углом 7.5 градусов к лучу зрения. В нижнем левом углу каждого графика указан угол, характеризующий положение линии аперид относительно наблюдателя.

дальных колебаний блеска, которые при определенных условиях могут возникать в молодых двойных системах (рис. 2). Рассматривается влияние модельных параметров систем на соотношение периодов возникающих циклов. Для этого параметры варьируются в следующих пределах: отношение масс компонентов $q = 0.1 - 0.5$, эксцентриситет $= 0 - 0.7$. Варьируется также параметр, определяющий вязкость системы. Приняты типичные для околозвездной пыли оптические характеристики пылинок. Расчеты показали, что бимодальные ко-

лебания возбуждаются в системах с эксцентрическими орбитами при условии, что компоненты системы не слишком сильно отличаются по массе.

Если орбита двойной системы круговая или вторичный компонент двойной системы маломассивный ($q \leq 0.1$), то на кривых блеска присутствуют только колебания с периодом равным орбитальному. При переходе от круговых орбит к эксцентричным ($e \geq 0.3$) появляется вторая мода колебаний, значение периода этих колебаний растет с увеличением эксцентриситета. Так же отношение периодов колебаний растет с увеличением соотношения масс компонентов двойной системы. Вязкость вещества СВ диска существенным образом сказывается на соотношении периодов колебаний блеска. При этом, при уменьшении вязкости мода со вторым периодом колебаний постепенно деградирует и исчезает. Кроме того, форма и амплитуда кривых блеска сильно зависит от ориентации двойной системы в пространстве. В это понятие входит не только угол наклона луча зрения к плоскости орбиты двойной системы, но, в случае эксцентричных орбит, и угол поворота линии апсид относительно наблюдателя.

В заключении второй главы проводится сравнение наблюдательных данных с результатами модельных расчетов. У некоторых звезд типа UX Ori наблюдаются бимодальные циклы в колебаниях блеска. Отношения периодов этих циклов определяются из наблюдений еще не очень точно, поскольку ряды фотометрических наблюдений в ряде случаев еще недостаточно продолжительны. Тем не менее, полученные из наблюдений соотношения периодов близки к теоретическим отношениям периодов $P_2 : P_1$ колебаний блеска, которые возникают в моделях молодых двойных систем. Это дает основания предполагать, что циклическая активность, по крайней мере, некоторых звезд типа UX Ori, действительно, может быть следствием их двойственности.

В третьей главе рассматривается модель циклических вариаций блеска молодой звезды с маломассивным компаньоном, аккрецирующим вещество из остатков протозвездного облака. Кроме случая, когда орбита двойной системы компланарна СВ диску, исследовано так же несколько моделей, в которых плоскость орбиты двойной системы наклонена к экваториальной плоскости диска на 10° . Для изучения поведения блеска в таких системах методом SPH были рассчитаны сетки газодинамических моделей двойных систем, на основе которых построены фазовые кривые блеска в зависимости наклона орбиты к лучу зрения и угла поворота линии апсид относительно наблюдателя. Параметры моделей варьировались в следующих пределах: отношение масс компонентов $q = 0.003 - 0.1$, эксцентриситет $e = 0 - 0.5$.

Во второй главе, было показано, что в двойных системах с маломассив-

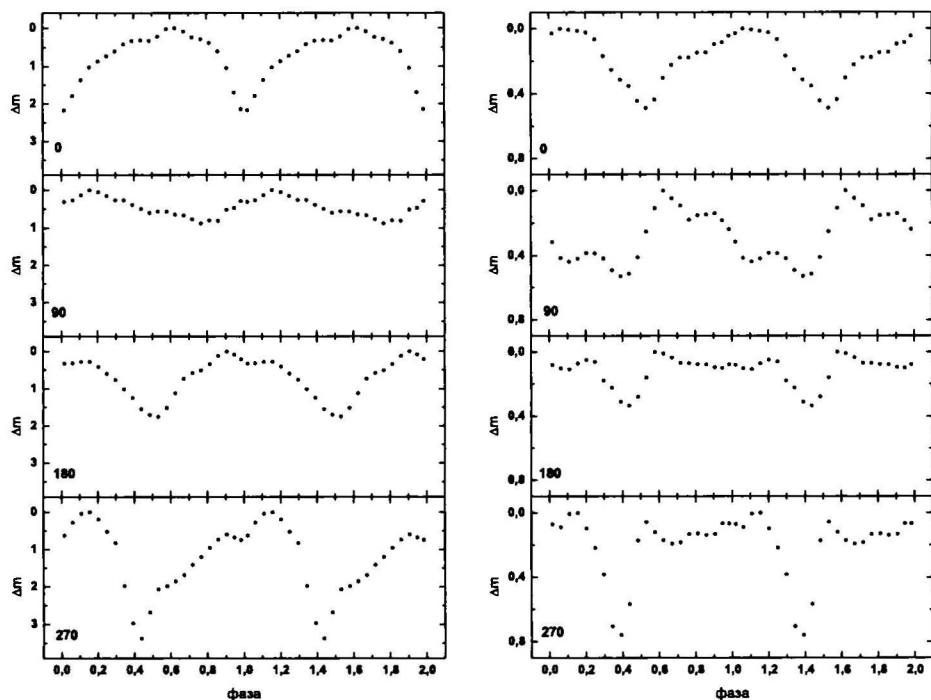


Рис. 3: Фазовые кривые блеска для модели: "теплый" диск ($c = 0.05$), $e = 0.5$, $q = 0.03$. Слева - луч зрения совпадает с плоскостью орбиты; справа - диск наклонен под углом 10 градусов к лучу зрения. В нижнем левом углу каждого графика указан угол поворота линии апсид относительно наблюдателя.

ным вторичным компонентом могут возникать только циклические колебания блеска с фазой орбитального периода. В третьей главе были получены доказательства того, что амплитуды и форма кривых блеска сильно зависят от угла наклона орбиты системы и ее ориентации относительно наблюдателя, а также от темпа аккреции. Расчеты показали, что в зависимости от ориентации системы могут наблюдаться как простые, почти синусоидальные изменения блеска,

так и более сложные двухкомпонентные кривые (рис. 3).

Анализ теоретических кривых блеска показал, что амплитуда переменности порядка 1^m может наблюдаться даже в тех случаях, когда масса вторичного компонента в 100 раз меньше массы главного. При этом заметная амплитуда колебаний блеска может наблюдаться даже при весьма малых значениях темпа аккреции, порядка $10^{-10} - 10^{-9} M_{\odot}$ в год, при тех углах наклона орбиты двойной системы к лучу зрения, для которых выполнены расчеты ($\leq 12^\circ$). Это дает основания полагать, что циклы активности звезд типа UX Ori могут быть вызваны движением вторичного компонента малой массы, в частности коричневого карлика или планеты-гиганта.

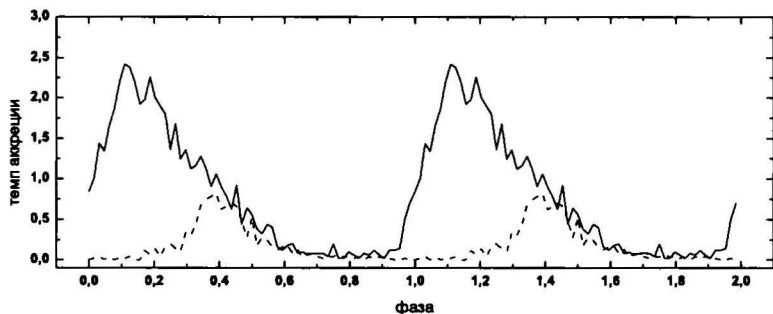


Рис. 4: Фазовая зависимость темпа аккреции для модели: "теплый" диск ($c = 0.05$), $e = 0.3$; $q = 0.1$. Пунктирной линией показан темп аккреции на главный компонент системы, сплошной — на вторичный. По оси ординат указан темп аккреции пробных частиц в единицу времени равную $1/64$ орбитального периода.

В четвертой главе исследуется аккреционная активность молодых двойных систем с отношением масс компонентов $q \leq 0.1$. Как и в предыдущих главах, источником аккрецирующего вещества является общий диск, окружающий двойную систему. На основе газодинамических моделей таких систем рассчитаны значения темпа аккреции на компоненты и исследована их зависимость от фазы орбитального периода. Показано, что, несмотря на малую

массу, вторичный компонент аккрецирует вещество в более высоком темпе по сравнению с главным компонентом (рис. 4). Этот вывод можно рассматривать как продолжение результатов, полученных Артимовичем и Любовым [23] для молодых двойных систем с неравными по массе компаньонами.

В случае эксцентрических орбит темп аккреции зависит от фазы орбитального периода. Такой же эффект получен для случая, когда орбита двойной системы круговая и ее плоскость не совпадает с экваториальной плоскостью СВ диска. Циклическая модуляция темпа аккреции с фазой орбитального периода может сказываться на различных характеристиках молодых звезд. Обсуждаются возможные астрофизические приложения теории.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты, полученные в работе.

В **приложении** приведен каталог теоретических кривых блеска, полученных в диссертации.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. На защиту выносятся результаты расчетов фотометрической активности молодых двойных систем, наблюдаемых с ребра или под небольшим углом к лучу зрения. Они представляют собой каталог модельных кривых блеска главного компонента, рассчитанных для полосы V стандартной фотометрической системы, для широкого набора параметров двойной системы.
2. Вывод о том, что заметная по амплитуде модуляция блеска двойной системы может наблюдаться при весьма умеренных значениях темпа аккреции газа на компоненты (вплоть до значений порядка $10^{-10} M_{\odot}$ в год), в том числе, в системах с маломассивными вторичными компонентами.
3. Вывод о влиянии вязкости вещества в СВ диске на параметры кривых блеска.
4. Вывод о том, что рассмотренная в диссертации модель фотометрической активности молодых звезд в общих чертах согласуется с характеристиками циклов активности звезд типа UX Ori.

Публикация результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях [1]-[4]. В статье [1] соискателем построен график теоретической кривой блеска молодой двойной системы. В статьях [3]-[4] автору принадлежат расчеты кривых блеска молодых двойных систем на основе SPH моделей, предоставленных одним из соавторов. Соискателем создан каталог кривых блеска, которые могут

наблюдаться в молодых двойных системах наклоненных под небольшим углом к лучу зрения. Часть этого каталога представлена в работах [3]-[4]. Вместе с соавторами проведен анализ поученных кривых блеска и исследована зависимость поведения блеска главного компонента от параметров двойной системы.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. В.П. Гринин, О.Ю. Барсунова, С.Г. Сергеев, Н.Я. Сотникова, Т.В. Демидова, "О природе уникальной затменной системы H 187 (HMW 15)", 2006, Письма в Астрон. журн. т. 32, с. 918
2. Т.В. Демидова, "Аккреционная активность молодых двойных систем с маломассивными вторичными компонентами", 2009, Астрофизика, т. 52 с. 623
3. Т.В. Демидова, Н.Я. Сотникова, В.П. Гринин, "Бимодальные колебания блеска в моделях молодых двойных систем", 2010, Письма в Астрон. ж., т. 36, № 6, с. 445
4. Т.В. Демидова, В.П. Гринин, Н.Я. Сотникова, "Колебания блеска в моделях молодых двойных систем с маломассивными вторичными компонентами", 2010, Письма в Астрон. ж., т. 36, № 7, с. 526

Литература

1. Гринин В.П., Барсунова О.Ю., Сергеев С.Г., Сотникова Н.Я., Демидова Т.В., 2006, Письма в Астрон. журн. т. 32, с. 918
2. Демидова Т.В., 2009, Астрофизика, т. 52 с. 623
3. Демидова Т.В., Сотникова Н.Я., Гринин В.П., 2009, Письма в Астрон. ж., т. 36 № 6 с. 445
4. Демидова Т.В., Гринин В.П., Сотникова Н.Я., 2010, Письма в Астрон. ж., т. 36 № 7 с. 526
5. McCaughrean M.J., Stapelfeld K. R., Close L.M., 2000, in Protostars and Protoplanets IV, p.485
6. Natta A., Grinin V., Mannings V., 2000, Protostars and planets IV, ed. by Manning V. et al. (Tucson: Univ. of Arisona Press), p. 559
7. Петров П.П., 2003, Астрофизика т.46, в.4. с.611
8. Hoffmeister C., 1949, Astr. Nach., Bd. 278, s. 24
9. Паренаго П.П., 1954, Труды Гос. астрономического ин-та им. П. К. Штернберга, т. 25

10. Herbst W., Eaton N.L., Hillenbrand L.A., 1994, *Astron. J.*, v. 108, p. 1906
11. Rostopchina A.N., Grinin V.P., Okazaki A. et al., 1997, *Astron. Astrophys.*, v.327, p. 145
12. Wenzel W., 1969, In: *Non-periodic Phenomena in variable stars*. IAU Colloq., Ed. by Detre L. Acad. Press, Budapest, № 65, p. 61
13. Gotz W., Wenzel W., 1968, *Mitt. Verand. Sterne*, Bd. 5, s. 13
14. Гринин В.П., 1988, *Письма в АЖ*, т. 14, с. 65
15. Grinin V.P., Kiselev N.N., Chernova G.P., Minikulov N.Kh., Voshchinnikov N.V., 1991, *Astrophys. Sp. Sci.*, v. 186, p. 283
16. Eisner J.A., Lane B.F., Hillenbrand L.A., Akeson R.L., Sargent A.I., 2004, *Astrophys. J.*, v. 613, p. 1049
17. Ростопчина А.Н., Гринин В.П., Шаховской Д.Н., 1999, *Письма в Астрон. Ж.*, т. 25, с. 291
18. Шаховской Д.Н., Гринин В.П., Ростопчина А.Н., 2003, *Астрон. журн.* т. 80, с. 631
19. Артеменко С.А., Гранкин К.Н., Петров П.П., 2010, *Астрон. журн.*, т.87, №2. с. 186
20. Ростопчина А.Н., Гринин В.П., Шаховской Д.Н., Ломач А.А., Миникулов Н.Х., 2007, *Астрон. журн.*, т. 84, с. 60
21. Гринин В.П., Ростопчина А.Н., Шаховской Д.Н., 1998, *Письма в Астрон. журн.*, т. 24, с. 925
22. Artymowicz P., Lubow, S.H., *Disks and Binary Protostars: GG Tauri*, 1994, *Astrophys. J.*, v. 421, p. 651
23. Artymowicz P. and Lubow S.H., 1996, *Astrophys. J.*, v. 467, p. L77
24. Rozyczka M., Laughlin G., 1997, *ASPC*, v. 121, p. 792
25. Mathieu R.D., Stassun K., Basri G. et al., 1997, *Astron. J.* v.113, p.1841
26. Basri G., Johns-Krull C.M., Mathieu R.D., 1997, *Astron. J.*, v.114, p. 781
27. Martin E.L., Magazzu A., Delfosse X., Mathieu R. D., 2005, *Astron. Astrophys.*, v. 429, p. 939
28. Gunther R., Kley W., 2002, *Astron. Astrophys.*, v. 387, p. 550
29. Сотникова Н.Я., Гринин В.П., 2007, *Письма в АЖ*, т. 33, с. 667
30. Сотникова Н.Я., 1996, *Астрофизика*, т.39, с.259

Подписано к печати 09.08.10 Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая. Печ. Л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ 4606.

Отпечатано в копировальном центре
Санкт-Петербург, 5-я Советская, 24

